

誘電体光伝送線路の研究

著者	大塚 晃
号	434
発行年	1973
URL	http://hdl.handle.net/10097/9170

氏 名（本籍）	^{おお} 大 ^{つか} 塚 ^{あきら} 晃（栃木県）
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 博 第 4 3 4 号
学位授与年月日	昭和 4 9 年 3 月 2 6 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研究科専門課程	東北大学大学院工学研究科 （博士課程）電子工学専攻
学 位 論 文 題 目	誘電体光電送線路の研究
論文審査委員	（主査） 教授 西沢 潤一 教授 虫明 康人 教授 西田 茂穂

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

近年，常温連続動作を可能にした二重ヘテロレーザが開発され，光ファイバーの低損失化がなされ，長距離通信のみならず，大容量情報処理に対して光波の利用が著しく有望となり現実味をおびてきている。さらにクラッド形ファイバーではモードによる分散のため帯域の狭い光伝送しか行なえなかったが，固体集束性光ファイバー（SSFファイバー）の出現によりモード間の分散が補償され，散乱損失が減少し，伝送特性が著しく改善された。低損失化のためガラスの吸収損失を減少する様努力が払われている一方，構造的に損失の小さい光伝送線路を実現しようという試みも行なわれている。Karbowiakにより提案されたマイクロガイドは，光エネルギーの大部分が表面波として膜の外部（気体）を伝播するので吸収による損失が少ないと考えられるが，支

持物による吸収損失が大きく、帯域もクラッド形ファイバーと同様に狭い。西沢らによって提案されたSSFマイクロガイドは、屈折率又は膜厚分布により集束効果を得ており、支持物による損失が小さいと同時に、各モードの群速度が等しく広帯域の伝送が可能である。第2章ではSSFマイクロガイドの製作方法及び光伝播特性について述べ、広帯域低損失光線路としての可能性を検討する。

光集積回路に用いられる光線路の製作方法がこれまで種々報告されているが、未だ真に実用に供し得る光線路の製作技術が確立されたとは言えない。従来の光線路は、ほとんど屈折率が階段状に変化するいわばクラッド形であり、界面の粗さによる散乱が大きいと同時に、モード分散も問題となってくる。拡散法を用いれば、側面の粗さによる散乱が少ない集束性光線路が実現できると考えられる。また拡散法によれば半導体等の結晶中にも光線路を形成でき、光変調・偏向及び光発振器を含むモノリシック光集積回路も実現可能である。第3章では受動光回路又は混成光集積回路のためのガラスに拡散した集束性光線路の製作方法及び光伝送特性について述べ、併せて拡散型光導波路の伝播特性の計算と比較する。また半導体の光線路として、シリコンにゲルマニウムを添加した光線路について述べる。

第2章 集束性薄膜表面波線路（SSFマイクロガイド）

SSFマイクロガイドは、基礎実験としてコロジオン及びアクリル樹脂を用いて製作した。合成樹脂の酢酸イソアミル溶液を一定流量で水面上に注出し、ガスを吹きつける等して乾燥しながら支持棒の上に薄膜を形成する。ガスの流れによる不均一乾燥により膜厚分布が実現された。代表的な光伝送膜は中心部で 1000 \AA 、周辺で 600 \AA の膜厚で、中心部分ではほぼ二乗分布である。膜厚を二乗分布と仮定した時の定数 y_0 の値は約 $1\sim 10\text{ mm}$ の間で制御でき、約 40 cm のコロジオンの伝送膜では長さ方向の膜厚変動は5%以下であった。この様にして製作した薄膜を顕微鏡で観察すると直径1ミクロン程度の円形の膜厚が変化している部分が多数見られた。これは酢酸イソアミルに水が溶け込み、乾燥の途中で過飽和となって水が凝縮して水滴となり、膜厚が変化したものと思われる。水に CaCl_2 等を溶かすと、この“気泡”の数は急激に減少するが、水の表面張力が減少してゴミや塩類が膜面に残る様になり、1%程度が最適であった。

SSFマイクロガイドへの光入射は重フリントガラス($n=1.82$)の35度プリズムを用いて行なった。プリズムと膜とのギャップによる干渉縞を観察しながら、平行度及び間隔を調整し、間隔約1ミクロンでHeNeレーザ光(波長 6328 \AA)を入射した。伝送光の散乱を顕微鏡で観察するとスポット状に散乱されており、散乱源の密度は“気泡”の密度とはほぼ一致する。この散乱光よりSSFマイクロガイドの伝播光の強度分布を知ることができる。膜厚分布の中心からずれたり、入射方向が中心軸方向とずれたりして光が入射すると集束効果によりSSFオプティカ

ルファイバーと同様に光ビームが蛇行する。入射ビームの位置が中心軸に近ずき、かつ入射方向が中心軸方向に近くなると蛇行が小さくなる。蛇行の周期から計算される膜厚分布の定数は実測値とはほぼ一致する。伝送線路の散乱光を膜に垂直方向からシャッタ速度を変えて写真を撮り、フィルム感光強度と伝送距離から減衰定数を測定した。光強度と黒化度がほぼ比例すると思われる範囲で片対数表示の傾きから求めた減衰定数とシャッタ速度を変えて同一黒化度を示す相対的距離から求めた減衰定数は一致する。自由表面として純水を用いて製作した伝送膜では、“気泡”による散乱が大きく約 4 dB/cm であった。 CaCl_2 を 1% 溶かした水を用いて製作した伝送膜では、伝送距離から 1 dB/cm 以下と思われる。伝送光ビームは散乱により広がり、蛇行部では散乱光が膜内を伝播するため外側へ散乱光強度分布がずれて観測される。

膜厚分布を有する S S F マイクロガイドが実現され、集束効果をもつことが実験的に確かめられたが、散乱損失が大きく期待された低損失光線路は得られなかった。最近 S S F マイクロガイドと類似の構造の単一材料による損失の小さいガラスファイバーが報告されたが、同様の方法でガラスの S S F マイクロガイドが製作できるものと思われる。赤外領域（3 ミクロン以上）ではガラスの吸収損失が大きいため、構造的に損失の減少できる S S F マイクロガイドが有望と考えられる。また S S F マイクロガイドは平面構造であるためファイバーにおけるらせんモードがなく、膜厚又は屈折率分布によりモードによる分散を全くなくすることができ、広帯域、低損失の光伝送線路が実現できると思われる。

第 3 章 拡散による光線路

表面から拡散して形成した光導波路は、屈折率が表面で最大で内部に向かって徐々に減少して基板の屈折率となるため、伝播光の電磁界分布が三層構造導波路と異なる。誘電率が表面から内部に距離に比例して減少すると近似すると、T E モードの電磁界はベッセル関数及び変形ベッセル関数を用いて表わすことができ、解析的に解ける。拡散型導波路の伝播定数は、拡散型導波路の表面の屈折率で、膜厚が拡散距離の半分とした三層構造導波路の伝播定数より小さいが、0 次モードのカットオフ近傍ではほぼ等しくなる。拡散型導波路は表面附近の屈折率が大きいため電磁界が空気中により多く分布し、結果として伝播定数が三層構造導波路より小さくなる。表面をコーティングすると伝播定数が大きくなるので、選択的にコーティングして光線路を形成できる。表面をコーティングした時とコーティングしない時の伝播定数から、表面の屈折率と拡散距離が決定される。

基板に拡散すると高屈折率となる様なイオンを含む高屈折率層を基板表面につけて拡散する場合の伝播定数を計算した。十分深く拡散し、イオン密度は表面からの距離に比例して減少し、誘電率の変化がイオン密度あるいは素成比に比例すると仮定した。T E₀ モードの伝播定数は、初め

につける高屈折率層が薄い場合、拡散距離を変えると途中で最大値をとる。表面を基板と同程度の屈折率の媒質でコーティングした時の伝播定数は拡散により単調に減少する。

拡散によって三次元光線路を製作すると横方向にも拡散し、側面の粗さによる散乱損失の小さい集束性光線路が形成される。表面拡散が大きい場合又は拡散するイオン密度に分布をもたせた場合は、拡散深さと比較して十分幅が広く、かつ分布がゆるやかで、光伝播特性はSSFマイクロガイドの場合と同様に考えられる。横方向の屈折率分布を、拡散型光導波路の等価屈折率の分布で近似することができ、集束効果の特性を知ることができる。

拡散によって光の進向方向にも屈折率が分布する場合には、膜厚が分布してモード変換がおき場合と同様に損失が少ないと考えられる。例えば誘電率が二つの媒質の間で距離に比例して変化しているとき、垂直入射光（平面波）の振幅反射率はベッセル関数を用いて表わすことができ、拡散距離が波長以上では反射が非常に小さくなることがわかる。拡散により誘電率が変化する場合は滑らかに変化するので、さらに反射が小さいと思われる。異なる伝播定数をもつ二本の光導波路が接続する場合も拡散により反射等モード変換損失が減少し、特に線路の幅が波長より大きい導波路の最低次状態では損失が小さいと思われる。

ガラスに拡散した光導波路は、スライドガラス（ $n = 1.521$ ）に鉛又はタリウムを真空蒸着し、空气中で熱処理して酸化、拡散して製作した。HeNe レーザ光をプリズム結合により導波路に入射した。ガラス基板への光入射の臨界角と導波路への入射角の差から伝播定数を決定すると誤差は小さく、測定によるばらつきは入射角で約4分、伝播の等価屈折率 β/k_0 で0.001以下であった。酸化鉛 740 \AA つけたスライドガラスを 550°C で熱処理すると、プリズム結合より求めた伝播の等価屈折率は、拡散時間約25時間で最大値1.5345となった。拡散時間による伝播定数の変化は、拡散距離が拡散時間の平方根に比例すると仮定すると、近似計算から求めた値と良く一致する。コーティングした時の伝播定数は拡散時間を長くすると単調に減少し、同様に近似計算と良く一致する。伝播定数が最大値を示す導波路の表面の屈折率は1.6、拡散距離は0.8ミクロンと計算され、求められた拡散距離は、拡散層の研磨速度の違いから測定した値とはほぼ一致する。

拡散時間を長くすると導波路の等価的な膜厚が増加し、光が表面からより内部に閉じ込められる様になり、表面での光強度が減少して散乱が少なくなる。比較的拡散時間の短い導波路をコーティングすると、コーティング中により多くの電磁界が分布し、結果的にガラス表面での電磁界強度が増大するため散乱が多くなる。しかし長時間拡散した導波路では、コーティングにより表面での屈折率の差が減少するため散乱損失は減少する。高周波スパッタ法でガラスでコーティングすると拡散層が着色するので、CVD法等によりガラスでコーティングして再び拡散すれば散乱損失は減少すると思われる。

ガラスに拡散し易いタリウムを拡散すると容易に表面に垂直方向で多モード伝送路となる。伝送光は拡散層内で蛇行し、表面での全反射の際の散乱光が縞状に観察される。プリズムへの入射角を小さくすると散乱光の周期即ち蛇行の周期が増大して一定値に近ずき、誘電率が二乗分布より小さく、ほぼ距離に比例して減少することを示している。

拡散するイオン数は蒸着膜厚を分布させて変えることができ、非常に容易に集束性光線路を製作でき、集束効果の大きさも制御することができた。表面拡散が大きいので、一定膜厚で線状に鉛を蒸着して拡散しても集束性光線路が形成できた。表面に垂直な方向で基本モードの低損失光線路は比較的容易にできるので、特に、横方向に屈折率分布をつけて集束性をもたせることが重要である。この様に一方向の集束効果ではSSFマイクロガイドと同様にらせん状モードがないので、すべてのモードが等しい群速度をもつようにできる。ピセインをマスクとして化学エッチングした後拡散して製作した幅50ミクロンの集束性光線路の伝送損失は、入・出力の二ケのプリズム結合を用いて測定し、約0.7 dB/cmであった。光入射位置を変化すると、50ミクロン光線路を伝播した光が一樣導波路に入射した時伝播方向が変化し、集束効果をもつことが確かめられた。フォトレジストによりマスクを作り、逆スパッタの後拡散して幅5ミクロン、曲率半径5mmの低損失光線路が製作できた。ニヤ・フールド・パターンから0次又は1次モードの伝播が観測され、伝送光は表面から1～2ミクロンの拡散層に閉じ込められている。線路の等価屈折率は基板より約0.8%，逆スパッタされた面の一樣導波路の等価屈折率より約0.5%程度大きく、計算では2つのモードだけが伝播し、放射損失の小さい最小曲率半径は約1mmである。実験では基本モードで伝播されることが多く、1次モードは散乱損失も大きくカット・オフに近い条件と思われる。選択的コーティングにより光線路を形成できたが、拡散した表面が粗いため散乱損失が大きく、低損失光線路を形成するにはCVD法によりガラスでコーティングした後拡散して、界面で屈折率が分布する様になければならない。

SiにGe等Ⅳ族元素を、GaP等Ⅲ－Ⅴ族化合物半導体にInとAs等のⅢ族とⅤ族の元素を添加して製作した光線路は光を吸収する不純物レベルを作らず、低損失光線路となると思われる。Geの拡散定数は小さいので、Geを添加したSiをエピタキシャル成長してから拡散した。炭酸ガスレーザを凹面鏡を用いてへき開面に入射し、光の伝送が確かめられた。無添加のSiエピタキシャル成長層でコーティングして拡散した場合も光が伝送したが、散乱損失の減少は測定されなかった。GaPにInとPを拡散して光線路を形成すれば、光発振も行えるので可視光でのモノリシック光集積回路も実現できると考えられる。

第4章 結 言

謝 辞

終始 御指導御鞭撻下さりました西沢潤一教授に心から感謝致します。有益な御指示、御助言を賜りました虫明康人教授、西田茂穂教授に深く感謝致します。

審 査 結 果 の 要 旨

光通信は次第に実用化に向って可能性をましつつあるが、光信号の位相ずれによる波形歪を除くことはなほ重要な問題である。単一モード伝送では十分な帯域がとれず、また伝送路の構造精度がはなはだきびしくなる。これらの点から集束性を持つように屈折率に分布を持たせた光伝送路が重要になる。本論文はこの集束性光伝送路のうち、長距離伝送にむいた表面波伝送を行う薄膜形と、光集積回路にむいた固体中に埋めこんだ拡散形についての実験と計算の結果を述べたものであって、全 4 章よりなる。

第 1 章は緒言であって、本論文に至るまでの歴史と背景を述べたものである。第 2 章は、薄膜形についての実験に関するものである。表面波伝送を行う膜の厚さは光波長の $1/10$ 程度の1程度であることが必要であるが、本論文で著者はさらに光のビームを膜の中心に集めておくため中央部が厚くへりの次第に薄くなる構造のものを試作している。このため実験に最も都合のよい数種の樹脂をえらんで溶媒にとかして水面上に浮かし、薄膜状となったものを枠にすくって部分乾燥させるという手法を開発して、見事にその試作に成功している。更に可視光をプリズムを介して入射させ、集束性のあることを実証している。このような薄膜伝送は、早くもベル研究所で追試された結果が発表されるに至っている。

第 3 章は光集積回路に重要な一種の配線技術に対応するものであって、まず固体表面から、屈折率の大きな、ないしは屈折率の大きくなる物質を拡散した場合の光伝送特性を理論的に求め、製作条件などを予測している。次いでガラス板に鉛やタリウムを附着させてから酸化後拡散させることによって試作を行い、光ビームを入射させて、予想されたとおり光は拡散された部分を導かれてゆくこと、また表面で周期的に全反射をくり返ししながら跳躍形の軌跡を画いて進むことなどを実測した。次いでシリコン中にゲルマニウムを拡散して部分的に屈折率をあげ半導体単結晶中に集束性導光路を形成した場合についても実測を行っている。

第 4 章は結論である。

以上要するに本論文は、所属研究室において提案されていた集束性導光路のなかで、これまでに試作研究されていたファイバの場合以外に、薄膜形と埋込形について考察と実測とを行い、光通信に新しい分野をひらいたもので電子工学に資するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。